

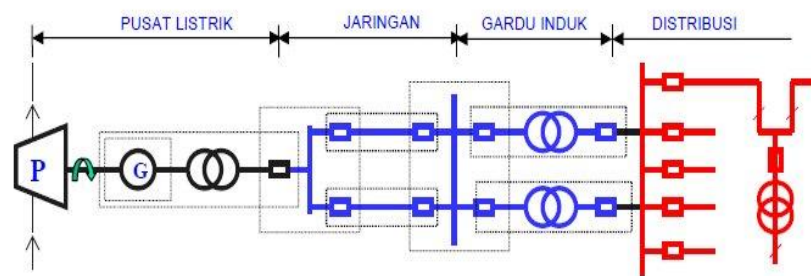
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

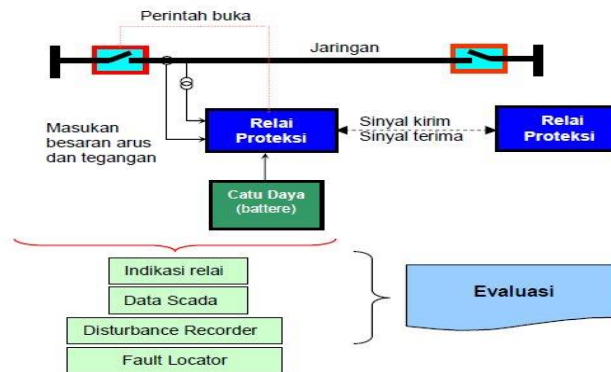
Jaringan tenaga listrik secara garis besar terdiri dari pusat pembangkit, jaringan transmisi (gardu induk dan jaringan) dan jaringan distribusi. Jaringan tenaga listrik terdiri dari banyak peralatan yang berbeda jenis dan karakteristik dan secara fisik dipisahkan oleh pemutus tenaga (PMT).

PMT berfungsi untuk memisahkan atau menghubungkan satu bagian jaringan dengan bagian lain, baik jaringan dalam keadaan normal maupun dalam keadaan terganggu. Bagian- bagian jaringan tersebut dapat terdiri dari satu PMT atau lebih.^[4]



Gambar 2.1 Jaringan sistem tenaga listrik^[4]

Dalam usaha untuk meningkatkan keandalan penyediaan energi listrik, kebutuhan sistem proteksi yang memadai tidak dapat dihindarkan. Sistem proteksi terdiri dari peralatan CT, PT, PMT, catu daya DC/AC, relai proteksi, teleproteksi yang diintegrasikan dalam suatu rangkaian *wiring*. Disamping itu diperlukan juga peralatan pendukung untuk kemudahan operasi dan evaluasi seperti sistem *recorder*, sistem *scada* dan indikasi relay (*annunciator*). Secara sederhana salah satu contoh sistem proteksi untuk jaringan sebagai berikut:

Gambar 2.2 Sistem proteksi jaringan ^[4]

Fungsi peralatan proteksi adalah untuk mengidentifikasi gangguan dan memisahkan bagian jaringan yang terganggu dari bagian lain yang masih sehat serta sekaligus mengamankan bagian yang masih sehat dari kerusakan atau kerugian yang lebih besar.

Sistem Proteksi harus memenuhi syarat Sebagai berikut:

1. Sensitif yaitu mampu merasakan gangguan sekecil apapun.
2. Handal yaitu akan bekerja bila diperlukan (*dependability*) dan tidak akan bekerja bila tidak diperlukan (*security*).
3. Selektif yaitu mampu memisahkan jaringan yang terganggu saja.
4. Cepat yaitu mampu bekerja secepat-cepatnya.^[4]

2.2 Pengertian Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus tenaga adalah alat yang terpasang pada gardu induk yang berfungsi untuk menghubungkan dan memutus arus beban atau arus gangguan.

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu PMT agar dapat melakukan hal-hal diatas, adalah sebagai berikut :

1. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus menerus.
2. Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.



3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan, dan merusak pemutus tenaga itu sendiri.^[6]

Setiap PMT dirancang sesuai dengan tugas yang akan dipikulnya, ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam rancangan suatu PMT, yaitu :

1. Tegangan efektif tertinggi dan Frekuensi daya jaringan dimana pemutus daya itu akan dipasang. Nilainya tergantung pada jenis pentanahan titik netral sistem.
2. Arus maksimum continue yang akan dialirkan melalui pemutus daya. Nilai arus ini tergantung pada arus maksimum sumber daya atau arus nominal beban dimana pemutus daya tersebut terpasang.
3. Arus hubung singkat maksimum yang akan diputuskan pemutus daya tersebut.
4. Lamanya maksimum arus hubung singkat yang boleh berlangsung. hal ini berhubungan dengan waktu pembukaan kontak yang dibutuhkan.
5. Jarak bebas antara bagian yang bertegangan tinggi dengan objek lain disekitarnya.
6. Jarak rambat arus bocor pada isolatornya.
7. Kekuatan dielektrik media isolator sela kontak.
8. Iklim dan ketinggian lokasi penempatan pemutus daya.^[2]

2.3 Fungsi Bagian Utama PMT

Ruangan pemutus tenaga ini berfungsi sebagai ruangan pemadam busur api, yang terdiri dari :

- a. Unit pemutus utama yang berfungsi sebagai pemutus utama

Unit pemutus utama ini berupa ruangan yang diselubungi bagian luar oleh isolator dari porselen dan disebelah dalamnya terdapat



ruangan udara, kontak- kontak bergerak yang dilengkapi oleh pegas penekan dan kontak tetap sebagai penghubung yang terletak melekat pada isolator porselen.

- b. Unit pemutus pembantu yang berfungsi sebagai pemutus arus yang melalui tahanan.

Unit pemutus pembantu ini berupa ruangan yang diselubungi bagian luar oleh isolator dari porselen dan disebelah dalamnya terdapat ruangan udara, kontak-kontak bergerak yang dilengkapi oleh pegas penekan dan kontak tetap sebagai penghubung yang terletak melekat pada porselen.

- c. Katup kelambatan

Berfungsi sebagai pengatur udara bertekanan dari pemutus utama ke unit pemutus pembantu, sehingga kontak pada unit pemutus pembantu akan terbuka kurang dari 25 ms (micro detik) setelah kontak-kontak pada pemutus utama terbuka. Katup kelambatan ini berupa bejana berbentuk silinder yang berongga sebagai ruang udara dan juga terdapat ruang pengatur, katup penahan, katup pengatur, rumah perapat, dan tempat katup.

- d. Tahanan.

Tahanan ini dipasang paralel dengan unit pemutus utama, yang berfungsi untuk :

- a. mengurangi kenaikan harga dari tegangan pukul
- b. mengurangi arus pukulan pada waktu pemutusan

- e. Kapasitor

Kapasitor ini dipasang paralel dengan tahanan, unit pemutus utama dan unit pemutus pembantu, yang berfungsi untuk mendapatkan pembagian tegangan yang sama pada setiap celah kontak, sehingga kapasitas pemutusan pada setiap celah sama besarnya.



f. Kontak-kontak

1. Unit pemutus utama Kontak bergerak dilapisi dengan perak terdiri dari:

- a. Kepala kontak bergerak
- b. Silinder kontak
- c. Jari-jari kontak
- d. Batang kontak
- e. Pegangan kontak Kontak tetap, terdiri dari :
 - Kepala kontak
 - Pegangan kontak

2. Unit pemutus pembantu

- a. Kontak bergerak
- b. Kontak tetap, yang terdiri dari:
 - Jari-jari kontak
 - Pegangan kontak

2.4 Klasifikasi PMT

Klasifikasi Pemutus Tenaga dapat dibagi atas beberapa jenis, antara lain berdasarkan tegangan rating/nominal, jumlah mekanik penggerak, media isolasi, dan proses pemadaman busur api.

2.4.1 Berdasarkan Besar/Kelas Tegangan

PMT dapat dibedakan menjadi 4, yaitu :

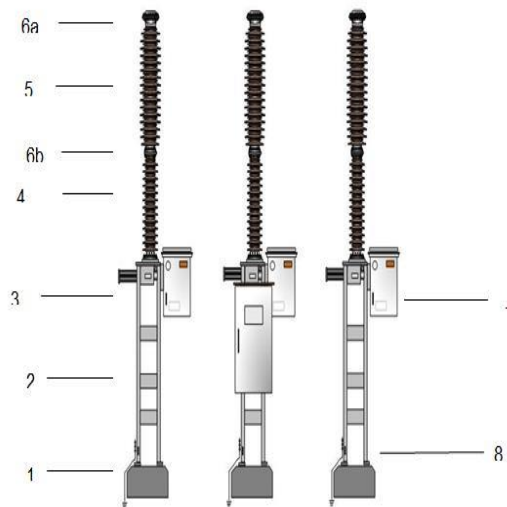
1. PMT tegangan rendah (low voltage)
Dengan range tegangan 0.1 s/d 1 kV (SPLN 1.1995 - 3.3).
 2. PMT tegangan menengah (Medium Voltage)
Dengan range tegangan 1 s/d 35 kV (SPLN 1.1995 – 3.4).
 3. PMT tegangan tinggi (High Voltage)
Dengan range tegangan 35 s/d 245 kV (SPLN 1.1995 – 3.5).
 4. PMT tegangan extra tinggi (Extra High Voltage)
Dengan range tegangan lebih besar dari 245 kVAC (SPLN 1.1995 – 3.6).^[7]
-

2.4.2 Berdasarkan Jumlah Mekanik dan Penggerak

PMT dapat dibedakan menjadi 2, yaitu :

1. PMT *Single Pole*

PMT type ini mempunyai mekanik penggerak pada masing-masing *pole*, umumnya PMT jenis ini dipasang pada bay penghantar agar PMT bisa reclose satu fasa.



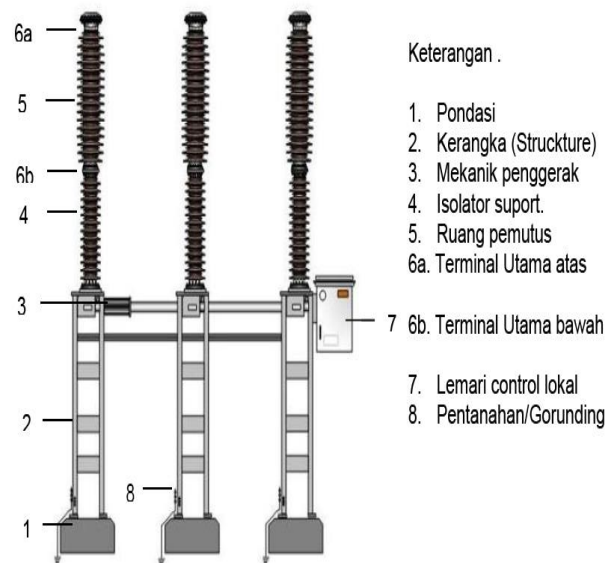
Gambar 2.3 PMT *Single Pole* ^[7]

Keterangan :

1. Pondasi
2. Kerangka (structure)
3. Mekanik penggerak
4. Isolator support
5. Ruang pemutus
6. a. terminal utama atas
b. terminal utama bawah
7. Lemari control lokal
8. Pentanahan /grounding

2. PMT *Three Pole*

PMT jenis ini mempunyai satu mekanik penggerak untuk tiga fasa, guna menghubungkan fasa satu dengan fasa lainnya dilengkapi dengan kopel mekanik, umumnya PMT jenis ini di pasang pada bay trafo dan bay kopel serta PMT 20 kV untuk distribusi.



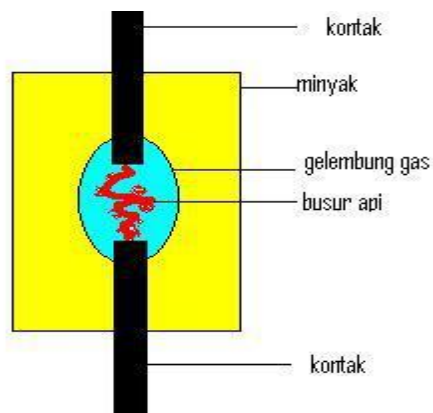
Gambar 2.4 PMT *Three Pole* ^[7]

2.4.3 Berdasarkan Media Isolasi

1. Pemutus Tenaga (PMT) Media Minyak.

Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus arus sampai 10 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 500 kV. Pada saat kontak dipisahkan, busur api akan terjadi didalam minyak, sehingga minyak menguap dan menimbulkan gelembung gas yang menyelubungi busur api, karena panas yang ditimbulkan busur api, minyak mengalami dekomposisi dan menghasilkan gas hydrogen yang bersifat menghambat produksi pasangan ion. Oleh karena itu, pemadaman busur api tergantung pada pemanjangan dan pendinginan busur api dan juga tergantung pada jenis gas hasil dekomposisi minyak.^[2]

²(Ir. Wahyudi Sarimun.N.MT.2012.Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik : Hal 56-61)



Gambar 2.5 Pemadaman busur api pada PMT minyak ^[8]

Gas yang timbul karena dekomposisi minyak menimbulkan tekanan terhadap minyak, sehingga minyak terdorong ke bawah melalui leher bilik. Di leher bilik, minyak ini melakukan kontak yang intim dengan busur api. Hal ini akan menimbulkan pendinginan busur api, mendorong proses rekombinasi dan menjauhkan partikel bermuatan dari lintasan busur api. Minyak yang berada diantara kontak sangat efektif memutuskan arus. Kelemahannya adalah minyak mudah terbakar dan kekentalan minyak memperlambat pemisahan kontak, sehingga tidak cocok untuk sistem yang membutuhkan pemutusan arus yang cepat.^[2]



Gambar 2.6 Oil Circuit Breaker ^[10]

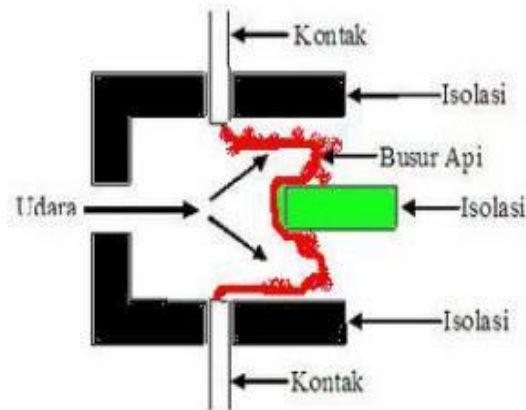


Sakelar PMT minyak terbagi menjadi 2 jenis, yaitu :

1. Sakelar PMT dengan banyak menggunakan minyak (Bulk Oil Circuit Breaker), pada tipe ini minyak berfungsi sebagai peredam loncatan bunga api listrik selama terjadi pemutusan kontak dan sebagai isolator antara bagian-bagian yang bertegangan dengan badan, jenis PMT ini juga ada yang dilengkapi dengan alat pembatas busur api listrik
2. Sakelar PMT dengan sedikit menggunakan minyak (Low oil Content Circuit Breaker), pada tipe ini minyak hanya dipergunakan sebagai peredam loncatan bunga api listrik, sedangkan sebagai bahan isolator dari bagian-bagian yang bertegangan digunakan porselen atau material isolasi dari jenis organik.^[2]

2. PMT Media Udara Hembus (*Air Blast Circuit Breaker*)

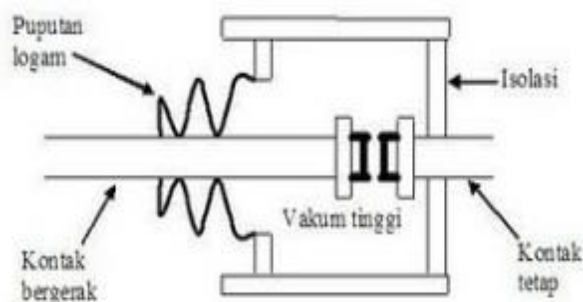
Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus arus sampai 40 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 765 kV. PMT udara hembus dirancang untuk mengatasi kelemahan pada PMT minyak, yaitu dengan membuat media isolator kontak dari bahan yang tidak mudah terbakar dan tidak menghalangi pemisahan kontak, sehingga pemisahan kontak dapat dilaksanakan dalam waktu yang sangat cepat. Saat busur api timbul, udara tekanan tinggi dihembuskan ke busur api dipadamkan oleh hembusan udara tekanan tinggi itu dan juga menyingkirkan partikel-partikel bermuatan dari sela kontak, udara ini juga berfungsi untuk mencegah restriking voltage (tegangan pukul ulang).^[2]

Gambar 2.7 Pemadaman busur api pada PMT *Air Blast* ^[8]

Kontak pemutus ditempatkan didalam isolator, dan juga katup hembusan udara. Pada sakelar PMT kapasitas kecil, isolator ini merupakan satu kesatuan dengan PMT, tetapi untuk kapasitas besar tidak demikian halnya.

3. PMT Media Vakum (*Vacuum Circuit Breaker*)

Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus rangkaian bertegangan sampai 38 kV. Pada PMT vakum, kontak ditempatkan pada suatu bilik vakum. Untuk mencegah udara masuk kedalam bilik, maka bilik ini harus ditutup rapat dan kontak Bergeraknya diikat ketat dengan perapat logam.^[2]

Gambar 2.8 Proses pemadaman busur api media vakum ^[8]

Jika kontak dibuka, maka pada katoda kontak terjadi emisi termis dan medan tegangan yang tinggi yang memproduksi elektron-elektron bebas. Elektron hasil emisi ini bergerak menuju anoda, elektron-elektron bebas ini tidak bertem dengan molekul udara sehingga tidak terjadi proses ionisasi. Akibatnya, tidak ada penambahan elektron bebas yang mengawali pembentukan busur api. Dengan kata lain, busur api dapat dipadamkan.^[2]



Gambar 2.9 Vacum circuit breaker ^[10]

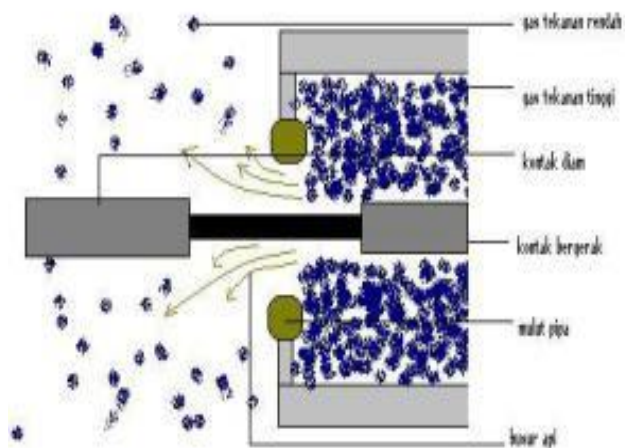
4. PMT Media Gas SF₆ (SF₆ Circuit Breaker)

Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus arus sampai 40 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 765 kV. Media gas yang digunakan pada tipe ini adalah gas SF₆ (*Sulphur hexafluoride*). Sifat gas SF₆ murni adalah tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun dan tidak mudah terbakar. Pada suhu diatas 150° C, gas SF₆ mempunyai sifat tidak merusak metal, plastic dan bermacam bahan yang umumnya digunakan dalam pemutus tenaga tegangan tinggi.^[2]



Gambar 2.10 SF₆ Circuit Breaker ^[10]

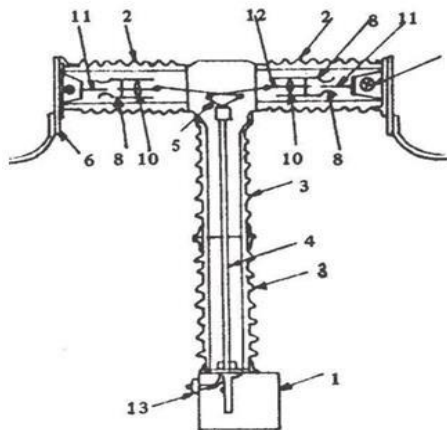
Selama pengisian, gas SF₆ akan menjadi dingin jika keluar dari tangki penyimpanan dan akan panas kembali jika dipompakan untuk pengisian kedalam bagian/ruang pemutus tenaga. Oleh karena itu gas SF₆ perlu diadakan pengaturan tekanannya beberapa jam setelah pengisian, pada saat gas SF₆ pada suhu lingkungan. ^[2]



Gambar 2.11 Proses pemadaman busur api pada SF₆ ^[8]

Sakelar PMT SF₆ terdiri dari 2 tipe, yaitu:

1. PMT Tipe Tekanan Tunggal (Single Pressure Type), PMT SF₆ tipe ini diisi dengan gas SF₆ dengan tekanan kira-kira 5 Kg/cm² . selama pemisahan kontak-kontak, gas SF₆ ditekan kedalam suatu tabung yang menempel pada kontak bergerak. Pada waktu pemutusan kontak terjadi, gas SF₆ ditekan melalui nozzle dan tiupan ini yang mematikan busur api.
2. PMT Tipe Tekanan Ganda (Double Pressure Type), dimana pada saat ini sudah tidak diproduksi lagi. Pada tipe ini, gas dari sistem tekanan tinggi dialirkan melalui nozzle ke gas sistem tekanan rendah selama pemutusan busur api. Pada sistem gas tekanan tinggi, tekanan gas SF₆ kurang lebih 12 Kg/cm² dan pada sistem gas tekanan rendah, tekanan gas SF₆ kurang lebih 2 kg/cm². Gas pada sistem tekanan rendah kemudian dipompakan kembali ke sistem tekanan tinggi.^[2]



Gambar 2.12 PMT Satu Katup 245 kV dengan Gas SF₆ ^[7]

Keterangan :

1. Mekanisme penggerak (operating mechanism).
2. Pemutus (interrupter).
3. Isolator penyangga dari porselen rongga (hollow support insulator porcelain).



4. Batang penggerak berisolasi glass Fibre (Fibre Glass Insulating Operating Rod).
5. Penyambung diantara no.4 dan no.12 (linkages).
6. Terminal-terminal.
7. Saringan (filters).
8. Silinder bergerak (movable cylinder).
9. Torak tetap (fixed piston).
10. Kontak tetap (fixed contact).

A. Keunggulan PMT Gas SF₆

Sementara itu, keunggulan PMT gas SF₆ dilihat dari keuntungan sifat-sifat dari gas SF₆ di atas dibandingkan dengan PMT jenis lain untuk mengamankan Gardu Induk dan jaringan yaitu :

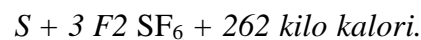
1. Hanya memerlukan energi yang rendah untuk mengoperasikan mekanismenya. Pada prinsipnya, SF₆ sebagai pemadam busur api adalah tanpa memerlukan energi untuk mengkompresikannya, namun semata-mata karena pengaruh panas busur api yang terjadi.
2. Tekanan SF₆ sebagai pemadam busur api maupun sebagai pengisolasi dapat dengan mudah dideteksi.
3. Penguraian pada waktu memadamkan busur api maupun pembentukannya kembali setelah pemadaman adalah menyeluruh.
4. Mampu mengembalikan kekuatan dielektrik dengan cepat, setelah arus busur api listrik melalui titik nol.
5. Relatif mudah terionisasi sehingga plasmanya pada PMT konduktivitas tetap rendah dibandingkan pada keadaan dingin. Hal ini mengurangi kemungkinan busur api tidak stabil dengan demikian ada pemotongan arus dan menimbulkan tegangan antar kontak.



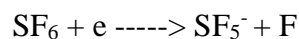
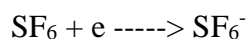
6. Karakteristik gas SF₆ adalah elektro negatif sehingga penguraiannya menjadikan dielektriknya naik secara bertahap.
7. Transien frekuensi yang tinggi akan naik selama operasi pemutusan dan dengan adanya hal ini busur api akan dipadamkan pada saat nilai arusnya rendah.
8. Selain itu PMT jenis ini simpel (tidak makan tempat)

2.5 Gas Sulphur Hexa Fluorida (SF₆)

Sulphur Hexa Fluorida (SF₆) merupakan suatu gas bentukan antara unsur *sulphur* dengan *fluor* dengan reaksi eksotermis :



Gas sulfur heksafluorida (SF₆) memiliki kekuatan isolasi yang tinggi disebabkan memiliki afinitas (*affinity*) untuk electron, yaitu bilamana suatu electron bebas bertubrukan dengan molekul gas netral guna membentuk ion negatif, electron akan diserap oleh molekul gas netral. Melekatnya electron dengan molekul gas netral itu dapat terjadi dengan dua cara :



Ion-ion negative yang terbentuk relative lebih berat bilamana disbanding dengan electron bebas, dan karenanya, didalam suatu medan listrik tertentu, ion-ion itu tidak memiliki jumlah energy yang cukup guna mengawali suatu ionisasi kumulatif didalam gas. Hal ini merupakan suatu cara yang efektif guna menyingkirkan elektron-elektron dari ruangan, yang mungkin akan dapat menyebabkan terjadinya suatu banjir elektron. Sifat ini memberikan suatu kekuatan dielektrik yang tinggi kepada SF₆.

Gas ini tidak hanya memiliki kekuatan dielektrik yang baik, akan tetapi juga mempunyai sifat khas untuk dapat cepat melakukan rekombinasi setelah sumber energy mata api dihilangkan. Ciri ini membuat SF₆ sangat efektif dalam memadamkan busur api. Gas SF₆ adalah kira-kira seratus kali lebih efektif daripada udara dalam memadamkan busur api. Gas SF₆ juga memiliki sifat baik dalam pemindahan panas, karena berat molekulnya yang



tinggi dan viskositas gas yang rendah menyebabkan gas ini dapat dengan baik memindahkan panas dengan konveksi dari terbanyak gas lainnya. Konstanta termal SF_6 rendah, hal ini menyebabkan tekanan penyimpanan maupun tekanan pemakaian gas ini dapat lebih rendah daripada udara.^[5]

Gas SF_6 merupakan gas terberat yang mempunyai massa jenis 6.139 kg/m³ yaitu sekitar 5 kali berat udara pada suhu 0⁰ celcius dan tekanan 1 atmosfir. Sifat gas SF_6 murni adalah tidak berbau, tidak berwarna, tidak beracun, tidak mudah terbakar, sifat tidak merusak metal, plastik dan bermacam-macam bahan yang umumnya digunakan dalam pemutus tenaga tegangan tinggi.

Sebagai isolasi listrik, gas SF_6 mempunyai kekuatan dielektrik yang tinggi (2,35 kali udara) dan kekuatan dielektrik ini bertambah dengan pertambahan tekanan. Sifat lain dari gas SF_6 ialah mampu mengembalikan kekuatan dielektrik dengan cepat, tidak terjadi karbon selama terjadi busur api dan tidak menimbulkan bunyi pada saat pemutus tenaga menutup atau membuka.

2.6 Sistem Penggerak

Berfungsi menggerakkan kontak gerak (*moving contact*) untuk operasi pemutusan atau penutupan PMT. Terdapat beberapa jenis sistem penggerak pada PMT, antara lain :

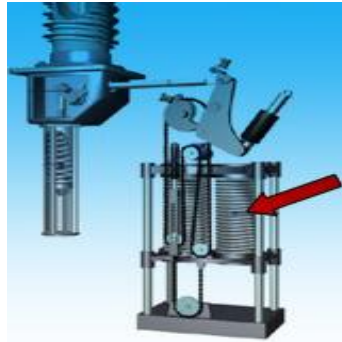
1. Penggerak pegas (*Spring Drive*)

Mekanis penggerak PMT dengan menggunakan pegas (*spring*) terdiri dari 2 macam, yaitu :

1. Pegas pilin (*helical spring*)

PMT jenis ini menggunakan pegas pilin sebagai sumber tenaga penggerak yang di tarik atau di regangkan oleh motor melalui rantai.

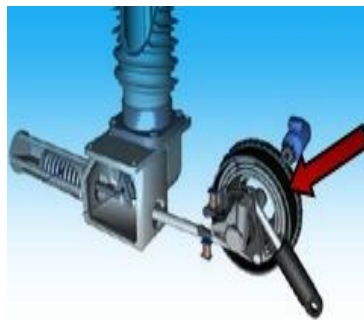
⁵ (Abdul Kadir.1998.Transmisi Tenaga Listrik : Hal 41-42



Gambar 2.13 Sistem pegas pilin (helical) ^[9]

2. Pegas gulung (*scroll spring*)

PMT ini menggunakan pegas gulung untuk sumber tenaga penggerak yang di putar oleh motor melalui roda gigi.



Gambar 2.14 Sistem pegas gulung (scroll) ^[9]

2. Penggerak Hidrolik

Penggerak mekanik PMT hidrolik adalah rangkaian gabungan dari beberapa komponen mekanik, elektrik dan hidrolik *oil* yang dirangkai sedemikian rupa sehingga dapat berfungsi sebagai penggerak untuk membuka dan menutup PMT.

3. Penggerak Pneumatic

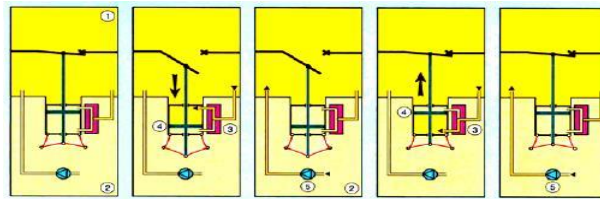
Penggerak mekanik PMT pneumatic adalah rangkaian gabungan dari beberapa komponen mekanik, elektrik dan udara bertekanan yang dirangkai sedemikian rupa sehingga dapat berfungsi sebagai penggerak untuk membuka dan menutup PMT.

4. SF6 Gas Dynamic

PMT jenis ini media memanfaatkan tekanan gas SF6 yang berfungsi ganda selain sebagai pemadam tekanan gas juga dimanfaatkan sebagai media penggerak. Setiap PMT terdiri dari 3 identik *pole*, dimana masing – masing merupakan unit komplit dari *Interrupter*, isolator tumpu, dan power aktuator yang digerakkan oleh gas SF6 masing – masing *pole* dalam *cycle* tertutup.

Energi untuk menggerakkan kontak utama terjadi karena adanya perbedaan tekanan gas SF6 antara :

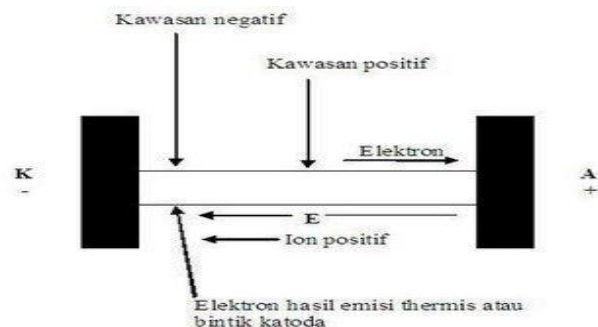
1. Volume yang terbentuk dalam *interrupter* dan isolator tumpu.
2. Volume dalam enclosure mekanik penggerak.^[9]



Gambar 2.15 Diagram mekanisme operasi PMT SF6 dynamic ^[10]

2.7 Proses Terjadinya Busur Api

Pada waktu pemutusan atau penghubungan suatu rangkaian sistem tenaga listrik maka pada PMT akan terjadi busur api, hal tersebut terjadi karena pada saat kontak PMT dipisahkan, beda potensial diantara kontak akan menimbulkan medan elektrik diantara kontak tersebut, seperti ditunjukkan pada gambar 2.17.



Gambar 2.16 Pembentukan Busur Api ^[2]



Arus yang sebelumnya mengalir pada kontak akan memanaskan kontak dan menghasilkan emisi termis pada permukaan kontak. Sedangkan medan elektrik menimbulkan emisi medan tinggi pada kontak katoda (K). Kedua emisi ini menghasilkan elektron bebas yang sangat banyak dan bergerak menuju kontak anoda (A). Elektron - elektron ini membentur molekul netral media isolasi dikawasan positif, benturan-benturan ini akan menimbulkan proses ionisasi.

Dengan demikian, jumlah elektron bebas yang menuju anoda akan semakin bertambah dan muncul ion positif hasil ionisasi yang bergerak menuju katoda, perpindahan elektron bebas ke anoda menimbulkan arus dan memanaskan kontak anoda. Ion positif yang tiba di kontak katoda akan menimbulkan dua efek yang berbeda. Jika kontak terbuat dari bahan yang titik leburnya tinggi, misalnya tungsten atau karbon, maka ion positif akan menimbulkan pemanasan di katoda.

Akibatnya, emisi termis semakin meningkat. Jika kontak terbuat dari bahan yang titik leburnya rendah, misal tembaga, ion positif akan menimbulkan emisi medan tinggi. Hasil emisi termis ini dan emisi medan tinggi akan melanggengkan proses ionisasi, sehingga perpindahan muatan antar kontak terus berlangsung dan inilah yang disebut busur api. Untuk memadamkan busur api tersebut perlu dilakukan usaha-usaha yang dapat menimbulkan proses deionisasi, antara lain dengan cara sebagai berikut:

1. Meniupkan udara ke sela kontak, sehingga partikel-partikel hasil ionisasi dijauhkan dari sela kontak.
2. Menyemburkan minyak isolasi kebusur api untuk memberi peluang yang lebih besar bagi proses rekombinasi.
3. Memotong busur api dengan tabir isolasi atau tabir logam, sehingga memberi peluang yang lebih besar bagi proses rekombinasi.



4. Membuat medium pemisah kontak dari gas elektronegatif, sehingga elektron - elektron bebas tertangkap oleh molekul netral gas tersebut.^[6]

Jika pengurangan partikel bermuatan karena proses deionisasi lebih banyak daripada penambahan muatan karena proses ionisasi, maka busur api akan padam. Ketika busur api padam, di sela kontak akan tetap ada terpaan medan elektrik. Jika suatu saat terjadi terpaan medan elektrik yang lebih besar daripada kekuatan dielektrik media isolasi kontak, maka busur api akan terjadi lagi.

2.8 Mekanisme Kerja PMT

Pemutus tenaga mempunyai dua posisi kerja, membuka dan menutup. Selama operasi penutupan, kontak-kontak penutup menutup melawan gaya-gaya saling berlawanan. Selama operasi pembukaan, kontak-kontak tertutup terpisah sedini mungkin. Mekanisme kerja pemutus tenaga harus melakukan gaya-gaya yang besar pada kecepatan yang tinggi. Waktu operasi antara saat penerimaan sinyal trip dan akhir pemisahan kontak dalam orde 0,03 detik (1,5 cycle) dalam pemutus tegangan tinggi. Pada pemutus lambat yang digunakan dalam sistem distribusi, waktu ini sekitar 3 siklus. Ketika menutup, penutupan kontak harus cepat dengan tekanan kontak yang tepat pada akhir perjalanan kontak. Jika kondisi ini tidak terpenuhi, pengelasan kontak dapat terjadi. Mekanisme harus mampu memberikan tugas khusus pemutus tenaga, kerja pembukaan dan penutupan.^[8]

2.8.1 Pembukaan jaringan

- PMT dioperasikan (dilepas) lebih dahulu
- Sebelum pemisah dioperasikan apakah PMT sudah terbuka sempurna, apakah amperemeter menunjukkan nol.

Urutan pembukaan jaringan :

1. PMT dibuka
2. PMS busbar dibuka



3. PMS *line* dibuka

3. PMS tanah ditutup ^[4]

Dalam operasi pembukaan, energi yang diperlukan untuk pembukaan dapat diperoleh dari salah satu metode tersebut :

- Pegas yang terbuka
- Minyak hidrolik tekanan tinggi yang tersimpan dalam akumulator.
- Udara kompresif tekanan tinggi yang dalam penerima udara .

2.8.2 Penutupan Jaringan

- PMT dioperasikan setelah pemisah-pemisah dihubungkan.
- Setelah PMT dihubungkan diperiksa apakah terjadi kebocoran isolasi pada PMT.

Urutan penutupan jaringan :

1. PMS tanah dibuka

2. PMS busabar ditutup

3. PMS *line* ditutup

3. PMT ditutup ^[4]

Secara normal, penutupan kontak-kontak pemutus tenaga dalam kondisi normal tidak menimbulkan persoalan. Mekanisme kerja harus mampu mengatasi gesekan dan mempercepat kontak gerak. Tetapi ketika pemutus tenaga menutup pda kondisi hubung singkat gaya elektromagnetik akan terlibat. Kapasitas penutupan pemutus tenaga tergantung atas gaya dan kecepatan pada waktu operasi penutupan dilakukan.

2.9 Gangguan Jaringan Transmisi

Untuk dapat menghitung besarnya arus gangguan yang terjadi pada saluran transmisi perlu diketahui data mengenai trafo tenaga yang terdapat pada Gardu Induk.

Ada 3 jenis gangguan yang terjadi pada saluran transmisi, yaitu :



1. gangguan hubung singkat 3 fasa
2. gangguan hubung singkat 2 fasa
3. gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

2.9.1 Perhitungan arus gangguan

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung arus gangguan adalah :

a. Hubung singkat Tiga-Fasa

$$i_{1F} = i_F = \frac{E_{a1}}{Z_1} \dots\dots\dots (2.1) ^{[1]}$$

b. Hubung singkat Dua-Fasa

$$i_{1F} = i_{2F} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2}$$

$$i_F = \sqrt{3} \cdot i_{2F} \dots\dots\dots (2.2) ^{[1]}$$

c. Hubung singkat Satu-Fasa ke Tanah

$$i_{1F} = i_{2F} = i_{0F} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$i_F = i_{1F} + i_{2F} + i_{0F} = 3i_{0F} \dots\dots\dots (2.3) ^{[1]}$$

Keterangan :

I_F = Arus gangguan

E_{a1} = Tegangan Fasa

Z = Impedansi

2.9.2 Perhitungan Impedansi

1. Impedansi dasar

Dalam suatu sistem tenaga listrik terinterkoneksi yang memiliki berbagai tingkat tegangan dan macam-macam peralatan daya adalah lebih mudah untuk bekerja dan membuat perhitungan-perhitungan dengan mempergunakan besaran-besaran system per-unit (pu). Nilai pu dari suatu besaran didefinisikan sebagai:

$$\frac{\text{Nilai actual suatu besaran}}{\text{Nilai acuan besaran yang sama}}$$

¹ (A. Arismunandar dan S. Kuwara.1993.Teknik Tegangan Tinggi Jilid II : Hal 73



Dalam teknik tenaga listrik terdapat tiga besaran dasar, yaitu tegangan, arus, dan impedansi. Bilamana dipilih dua besaran sebagai acuan, maka besaran ketiga akan dengan sendirinya memiliki nilai acuan juga. Misalnya bilamana tegangan V dan arus I merupakan besaran dasar, maka impedansi dasar sudah jelas karena:

$$Z = V / I$$

Biasanya dari suatu mesin listrik (trafo) disebut tegangan nominal dalam besaran V dan kapasitas kVA sebagai besaran-besaran dasar. Misalkan V_d merupakan tegangan dasar dan kVA_d merupakan kapasitas dasar, maka dapat ditulis:

$$\begin{aligned} V_{pu} &= \frac{V_{aktual}}{V_d} \\ \text{Arus dasar} &= \frac{kVA_d \times 1000}{V_d} \\ \text{atau } I_{pu} &= \frac{\text{Arus aktual}}{\text{Arus dasar}} = \frac{\text{Arus aktual}}{kVA_d \times 1000} \times V_d \\ \text{Impedansi dasar} &= \frac{\text{Tegangan dasar}}{\text{Arus dasar}} \\ Z_d &= \frac{V_d^2}{kVA_d \times 1000} \dots\dots\dots(2.4)^{[5]} \\ \text{atau } Z_{pu} &= \frac{\text{Impedansi aktual}}{\text{impedansi dasar}} \\ Z_{pu} &= \frac{Z \cdot kVA_d \times 1000}{V_d^2} \\ Z_{pu} &= \frac{Z \cdot MVA}{(kV_d)^2} \dots\dots\dots(2.5)^{[5]} \end{aligned}$$

Keterangan :

- Z_d = impedansi dasar
- Z_{pu} = impedansi per-unit
- V_d = tegangan dasar
- kVA = kapasitas dasar (daya trafo)

⁵ (Abdul Kadir.1998.Transmisi Tenaga Listrik : Hal 13

2. Impedansi sumber

Impedansi sumber diambil dari arus beban puncak yang mengalir dari system interkoneksi ke gardu induk. Dalam kasus ini diambil arus beban puncak adalah 5 kA. Besarnya nilai impedansi sumber dapat diketahui dengan menggunakan persamaan :

$$X_s = \frac{kV^2}{MVA_{SC}} \dots\dots\dots (2.6)^{[2]}$$

Keterangan :

X_s : Impedansi sumber

kV : Tegangan pada sisi primer

MVA_{SC} : Daya hubung singkat

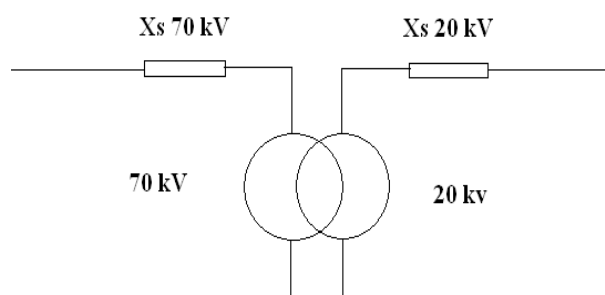
Dimana untuk daya hubung singkat menggunakan persamaan:

$$MVA_{SC} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \text{ (MVA)} \dots\dots\dots (2.7)^{[2]}$$

Impedansi sumber ini merupakan nilai impedansi pada sisi primer. Untuk menghitung nilai impedansi sumber pada sisi sekunder maka harus dikonversi terlebih dahulu.

Daya trafo tenaga antara sisi primer dan sekunder sama, maka :

$$MVA_{70 \text{ kV}} = MVA_{20 \text{ kV}}$$



Gambar 2.17 Transformasi impedansi pada trafo tenaga

$$\text{Daya sisi 70 kV} = \text{Daya sisi 20 kV}$$

$$\frac{kV_1^2}{Z_1} = \frac{kV_2^2}{Z_2}$$



Keterangan :

kV_1^2 = tegangan sisi primer

kV_2^2 = tegangan sisi sekunder

Z_1 = impedansi sisi primer

Z_2 = impedansi sisi sekunder

2.9.3 Perhitungan Impedansi Trafo Tenaga di Gardu Induk

Untuk suatu transformator impedansi dapat ditinjau dari sisi tegangan tinggi atau tegangan rendahnya. Apabila persen atau per-unit dari impedansi suatu transformator ditinjau dari sisi tegangan rendahnya, maka besarnya juga dipilih dari tegangan rendahnya.

$$Z(\%) = \frac{\text{Impedansi (ohm)} \times \text{Daya (MVA)}}{[\text{Tegangan (kV)}]^2} \times 100 \dots\dots\dots (2.8) [1]$$

$$Z(\text{ohm}) = \frac{\text{Impedansi (\%)} \times [\text{Tegangan (kV)}]^2}{\text{Daya (MVA)} \times 100} \dots\dots\dots (2.9) [1]$$

2.9.4 Impedansi Penyulang

Impedansi penyulang dapat diketahui melalui data teknis pada Gardu Induk. Untuk mengetahui besar impedansi penyulang pada suatu titik gangguan tertentu dapat disimulasikan pada gangguan 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang penyulang.

Besar nilai impedansi urutan positif dan urutan negatif penyulang untuk setiap titik gangguannya adalah sebagai berikut :

Impedansi urutan positif (Z_1) = Impedansi Urutan negatif (Z_2)

Misalkan, S = Panjang saluran

Untuk panjang 25% = $0,25 \times S \times (Z_1) = (Z_1 \text{ 25\%}) \text{ ohm}$

Dari perhitungan impedansi urutan positif dan urutan negatif diatas, maka dapat dicari pula untuk impedansi urutan positif ekivalen ($Z_{1 \text{ eki}}$) dan impedansi urutan negatif ekivalen ($Z_{2 \text{ eki}}$). $Z_{1 \text{ eki}}$ dan $Z_{2 \text{ eki}}$ dapat langsung dihitung sesuai dengan lokasi gangguan dengan menjumlahkan $X_S + X_T + \% Z_L$.

¹ (A. Arismunandar dan S. Kuwara.1993.Teknik Tegangan Tinggi Jilid II : Hal 71



Hitungan $Z_{1\text{eki}}$ dan $Z_{2\text{eki}}$

$$Z_{1\text{ eki}} = Z_{2\text{ eki}} = X_S + X_T + Z_{\text{penyulang}} \dots\dots\dots(2.10) \text{ }^{[2]}$$

Keterangan: X_S = perhitungan impedansi sumber

X_T = perhitungan impedansi trafo

$Z_{\text{penyulang}}$ = impedansi penyulang ($Z_1 = Z_2$)

2.9.5 Perhitungan Z_0 ekivalen

Impedansi urutan nol (Z_0) dapat diketahui berdasarkan data teknis pada Gardu Induk. Dimana besarnya impedansi urutan nol dapat disimulasikan sebagai berikut :

Misalkan, S = Panjang saluran.

Untuk panjang 25% $= 0,25 \times S \times (Z_0) = (Z_0 25\%) \text{ ohm}$

Tabel 2.1 Karakteristik urutan nol (zero sequence) dari variasi elemen pada system tenaga listrik.^[2]

Elemen	Z_0
Trafo Tenaga (dilihat dari sisi sekunder)	
1. Tanpa pembumian	Tak hingga
2. Yyn atau Zyn	10 s/d $15 \cdot X_1$
3. Ydyn	$3 \cdot X_1$
4. Dyn atau YNyn	X_1
5. Dzn atau Yzn	0,1 s/d $0,2 X_1$
Generator	
1. Sinkron	$0,5 \cdot Z_1$
2. Asinkron	0
Jaringan	$3 \cdot Z_1$

² (Ir. Wahyudi Sarimun.N.MT.2012.Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik : Hal 166-169)



$$Z_0 E_{ki} = X_{0T} + 3.RN + Z_0 \text{ penyulang} \dots\dots\dots(2.11) \text{ [2]}$$

Keterangan :

- X_{0T} : hitungan X_0 trafo
 RN : tahanan pentanahan trafo
 Z_0 penyulang : impedansi penyulang (Z_0)

2.9.6 Pengaruh Tekanan terhadap Kecepatan Busur Api

Pengaruh tekanan terhadap gerak laju busur api telah diuji dalam rating tekanan 100 kPa sampai dengan 510 kPa (F. Y. Chu et. Al dalam Heryanto 2006 : 100). Pengujian ini menunjukkan adanya hubungan terbalik antara kecepatan aksial busur api dengan tekanan gas. Kecepatan arus normalisasi turun dalam rating 0,2cm/s.kA.kPa pada jarak celah elektroda 6,6 cm. pada gas SF_6 bertekanan 1 bar kecepatan busur api adalah sebesar 136 cm/s kA. Berikut ini adalah tabel pengujian kecepatan busur api dengan celah konstan terhadap pengaruh tekanan.^[3]

Tabel 2.2 Perbandingan kecepatan busur api terhadap tekanan ^[3]

Gas	Jarak Sela (cm)	Tekanan (kPa)	Pengujian (cm/s.kA)
SF_6	6,6	100	136
SF_6	6,6	250	120
SF_6	6,6	350	100
SF_6	6,6	450	85
SF_6	6,6	510	84

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan seperti pada tabel 2.2 maka dapat dicari perhitungan kecepatan busur api terhadap tekanan pada saat terjadi arus gangguan. Perubahan tekanan mempengaruhi dari laju busur api, dimana :



$$P = P_{PMT} - P_{Uji} \dots\dots\dots (2.12)^{[3]}$$

Keterangan :

P : perubahan tekanan

P_{PMT} : tekanan pada pemutus tenaga

P_{Uji} : tekanan pengujian

Gas SF₆ memiliki penurunan normalisasi kecepatan 0,2cm/s.kA.kPa sehingga factor penurunan kecepatan untuk perubahan tekanan pada pemutus tenaga (PMT) :

$$U_N = P \times 0,2 \text{ cm/s.kA.kPa} \dots\dots\dots (2.13)^{[3]}$$

Keterangan :

U_N : pengurangan kecepatan busur api (cm/s.kA)

P : perubahan tekanan (kPa)

Dari pengurangan tingkat kecepatan maka kecepatan laju busur api terhadap tekanan pada PMT :

$$U_{PMT} = U_{uji} - U_N \dots\dots\dots (2.14)^{[3]}$$

dan untuk kecepatan busur api ketika terjadi arus gangguan :

$$U_{arc} = U_{PMT} \times I_F \dots\dots\dots (2.15)^{[3]}$$

³ (Irwan Heryanto.2006.Jurnal ELTEK : Hal 96-104)